

MENYELESAIKAN KONTRADIKSI KUALITAS PERMUKAAN DAN WAKTU PRODUKSI PADA PENCETAKAN 3D MATERIAL PETG MELALUI OPTIMASI BERBASIS DESAIN EKSPERIMEN

Anthonius Adi Nugroho ¹⁾, Kurniawan Billy Santoso ²⁾,
Gabriel Bagus Karyadi ³⁾, Kristian Ismartaya ^{4*)}

^{1,2,4)} Program Studi Desain Produk, Fakultas Arsitektur dan Desain, Universitas Kristen Duta Wacana

³⁾ Program Studi Rekayasa Teknologi Manufaktur, Politeknik ATMI Surakarta

Email: kristianismartaya@staff.ukdw.ac.id

Abstrak. Penelitian hendak menganalisis dan mengoptimalkan parameter proses pencetakan 3D material PETG guna mencapai kualitas permukaan maksimal dan waktu cetak minimal secara bersamaan. Temuan ini diharapkan menjadi solusi UMKM untuk meningkatkan efisiensi produksi tanpa mengorbankan kualitas produk. Penelitian menerapkan *Design of Experiment* (DoE) menggunakan pendekatan *Response Surface Method* (RSM) dengan metode Box-Behnken yang menghasilkan 26 variasi perlakuan eksperimen. Sedangkan ANOVA diterapkan untuk mengidentifikasi faktor yang signifikan. Metode penilaian dengan *Desirability Function* selanjutnya digunakan untuk optimasi multi-respon sehingga dapat diperoleh parameter terbaik untuk setiap sudut pencetakan *print orientation*. Uji konfirmasi dilakukan menggunakan setiap parameter terbaik untuk memvalidasi keberhasilan parameter secara aktual. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *print orientation* merupakan faktor yang signifikan dengan kontribusi sebesar 52,99% untuk respon kekasaran permukaan dan 81,92% untuk respon waktu. Optimasi berhasil menghasilkan parameter terbaik untuk setiap sudut *print orientation*, dengan hasil spesimen berukuran sama. Sudut *print orientation* 0° mampu mencapai kekasaran permukaan minimal 1,78 µm dalam waktu 1450 detik. Sudut *print orientation* 15° mencapai kekasaran permukaan minimal 23,19 µm dan waktu 5270 detik, sementara sudut 30° mencapai 27,90 µm dan waktu 8780 detik. Sedangkan sudut 45° dapat mencapai kekasaran terendah 13,71 µm dengan waktu proses 11825 detik. Penelitian memberikan rekomendasi parameter proses cetak yang terverifikasi secara empiris. Temuan ini menjadi panduan praktis untuk meningkatkan efisiensi produksi dan kualitas visual produk cetak 3D-PETG. Optimasi multi-respon berhasil dilakukan dan menghasilkan parameter terbaik yang spesifik untuk setiap sudut orientasi cetak. Analisis menunjukkan bahwa kombinasi faktor sudut *print orientation* dan *layer thickness* merupakan faktor utama mempengaruhi kedua respon kualitas permukaan dan waktu proses secara simultan. Model yang dibangun terbukti akurat melalui uji konfirmasi.

Kata Kunci: additive manufacturing, PETG, RSM, surface roughness, time process.

PENDAHULUAN

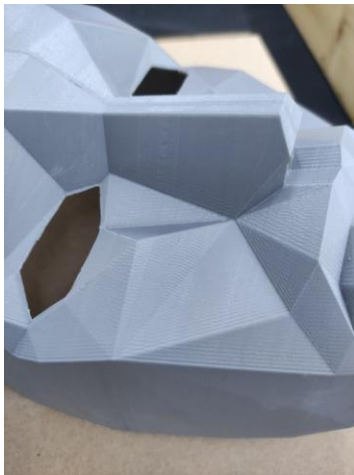
Additive manufacturing (AM) saat ini berkembang pesat seiring kebutuhan *rapid prototyping*. AM merupakan proses produksi dengan mengendapkan lapisan tipis filamen secara progresif, lapis demi lapis di atas satu sama lain (Dezaki et al., 2020; Arian, 2023; Lokesh et al., 2023; Jablonska & Lastowska, 2024). *Fused Deposition Modeling* (FDM) merupakan salah satu teknik AM yang paling banyak digunakan (Dezaki et al., 2020). FDM dapat menghasilkan komponen dengan kontur yang kompleks dengan mendepositkan filamen termoplastik secara akurat dan cepat (Haque et al., 2025; Kaya & Asici, 2025) berdasarkan model yang dirancang dan diinput melalui CAD (Bruni et al., 2020). Teknologi ini diaplikasikan di sektor UMKM dan industri karena keunggulannya dalam operasional yang sederhana, biaya yang rendah, kebebasan dalam

bentuk dan desain kompleks, limbah yang minimal, serta hemat waktu (Barrios & Romero, 2019; Arian, 2023; Kadhum et al., 2023; Jablonska & Lastowska, 2024; Sukindar et al., 2024). Meski demikian, FDM memiliki keterbatasan dalam hal kualitas kekasaran permukaan dan akurasi dimensi (Jablonska & Lastowska, 2024). Hal ini sejalan dengan pernyataan Sukindar et al., 2024 bahwa komponen yang diproduksi menggunakan FDM memiliki kekasaran permukaan yang paling tinggi dibanding proses lain. Isu mengenai kualitas kekasaran permukaan dialami oleh pelaku usaha 3D print di skala UMKM dan industri, seperti ditampilkan Gambar 1 dan Gambar 2. Gambar 1 dan Gambar 2 merupakan data primer yang diperoleh melalui dokumentasi pribadi peneliti secara sistematis, yang digunakan sebagai *representative case*

study untuk mendukung isu kualitas permukaan yang diangkat dalam penelitian ini.



Gambar 1. Kualitas permukaan buruk pada prototype fitting lampu dekorasi
Sumber: Dokumentasi pribadi, 2025



Gambar 2. Kualitas permukaan yang buruk pada produk topeng seni
Sumber: Dokumentasi pribadi, 2025

Bagi UMKM, kualitas permukaan produk menjadi salah satu kriteria visual yang harus dicapai untuk meningkatkan keunggulan kompetitif dan kepuasan konsumen (Sukindar et al., 2024). Di sektor industri, kekasaran permukaan produk sangat berkaitan erat dengan dimensi yang presisi dan keberhasilan untuk pemenuhan fungsi komponen (Haadeyah et al., 2023; Jablonska & Lastowska, 2024), serta ketahanannya terhadap gesekan (*tribology* bawaan) dengan komponen lain (Vidakis et al., 2022; Lokesh, 2023). Dengan demikian, permasalahan kualitas permukaan dalam proses 3D print menjadi topik penting untuk diteliti (Mehtedi et al., 2024).

Material *Polyethylene Terephthalate Glycol* (PETG) dibahas dalam penelitian ini.

PETG memiliki kekasaran permukaan yang tinggi karena viskositasnya yang rendah (Hadeeyah et al., 2023). Filamen PETG umumnya dipilih dalam proses produksi sebab memiliki sifat kekuatan mekanik tinggi, ulet dan fleksibel, tahan benturan, tahan terhadap perubahan temperatur, memiliki lapisan adhesi yang baik, dan penyusutannya yang minimal (Kadhum et al., 2023; Jablonska & Lastowska, 2024; Haque et al., 2025). Keunggulan tersebut mendorong tingginya penggunaan PETG sebagai bahan baku komponen yang bekerja pada area yang terpapar cahaya matahari langsung atau terpapar kimiawi tertentu, maupun produk dengan beban kerja tinggi (Barrios & Romero, 2019) seperti *housing*, *connector*, *bracket*, *frame*, dan *gears* (Jablonska & Lastowska, 2024).

Dalam proses manufaktur, parameter proses dan jenis material mempengaruhi kualitas komponen yang akan diproduksi (Vidakis et al., 2022). Parameter proses cetak dieksplor hingga menghasilkan parameter terbaik yang mampu menghasilkan kekasaran permukaan yang minimal (Mehtedi et al., 2024), sebab kualitas permukaan dipengaruhi oleh parameter proses 3D print (Barrios & Romero, 2019; Kadhum et al., 2023; Lokesh et al., 2023; Jablonska & Lastowska, 2024). Namun penelitian Arian, 2023 mengungkap fakta bahwa parameter yang digunakan untuk mencapai kualitas permukaan yang baik menimbulkan aspek negatif berupa kecepatan cetak (*printing speed*) yang lambat dan biaya proses yang tinggi. Hal ini sesuai dengan yang dialami industri dan UMKM, yaitu dilema dalam mengutamakan waktu produksi tercepat atau kualitas permukaan yang baik, karena kedua respon saling bertolak belakang. Padahal, saat ini 3D print bertransisi ke produksi cepat, sehingga kualitas tinggi pada permukaan komponen dituntut dapat dicetak dengan cepat (Sukindar et al., 2024) dengan biaya produksi minimum (Kaya & Asici, 2025). Sukindar et al., 2024 dalam penelitiannya menyatakan bahwa pada dasarnya proses FDM berbiaya rendah, kualitas permukaan tinggi, dan toleransi yang baik, dapat dicapai dengan menyesuaikan parameter pencetakan yang tepat. Dengan demikian, perlu dilakukan penelitian yang membahas parameter proses 3D print yang mampu menghasilkan produk dengan kualitas permukaan yang tinggi dan waktu proses yang minimal.

Terdapat beberapa penelitian terdahulu yang membahas kualitas dimensi dan permukaan komponen 3D print, namun sangat minim secara kuantitas (Bruni et al., 2020). Penelitian yang membahas kekasaran permukaan produk 3D print melibatkan parameter proses cetak yang dapat dikontrol untuk meningkatkan kualitas produk melalui identifikasi parameter terbaik (Kadhun et al., 2023). *Layer thickness* merupakan faktor yang paling banyak digunakan dalam penelitian-penelitian terdahulu, antara lain penelitian oleh Barrios & Romero, 2020; Bruni et al., 2020; Vidakis et al., 2022; Lokesh et al., 2023; Mehtedi et al., 2024; Sukindar et al., 2024; Kaya & Asici, 2025. Penelitian Barrios & Romero, 2020; Bruni et al., 2020; Vidakis et al., 2022; Lokesh et al., 2023; Mehtedi et al., 2024; Sukindar et al., 2024; dan Kaya & Asici, 2025. Selain *layer thickness*, penelitian Lokesh et al., 2023; Kadhun et al., 2023; dan Kaya & Asici, 2025 menambahkan faktor *infill pattern* dan *anneal temperature*, sementara itu penelitian Barrios & Romero, 2020; Vidakis et al., 2022; dan Sukindar et al., 2024 menambahkan faktor *print speed* dan *nozzle temperature*. Terdapat pula penelitian yang melibatkan faktor orientasi sudut cetak pada saat proses (Lokesh et al., 2023 dan Sukindar et al., 2024). Penelitian Dezaki et al., 2020; Bruni et al., 2020; Jablonska & Latowska, 2024; dan Mehtedi et al., 2024 melibatkan parameter proses pemesinan manufaktur frais dan bubut dalam penelitiannya. Pengerjaan dengan mesin efektif menghilangkan ketidaksempurnaan seperti deformasi dan kekasaran permukaan (Jablonska & Latowska, 2024) namun memiliki kelemahan inherent karena menambah proses, biaya, dan waktu produksi secara keseluruhan. Penelitian terdahulu didominasi pembahasan kualitas pada material PLA dan ABS. Pembahasan kualitas permukaan material PETG dilakukan oleh Barrios & Romero, 2020; Hadeeyah et al., 2023; Lokesh et al., 2023; dan Mehtedi et al., 2024. Beberapa penelitian mengkombinasikan respon kekasaran permukaan dengan akurasi dimensi (Bruni et al., 2020; Vidakis et al., 2022; Jablonska & Latowska, 2024; dan Kaya & Asici, 2025). Penelitian lain umumnya mengkombinasikan kekasaran permukaan dan sifat mekanik material (seperti: kekuatan tarik, tekan, dan tekuk), sedangkan penelitian Arian, 2023 mengkombinasikan sifat mekanik material dan

penghematan biaya. Penelitian Vidakis et al., 2022; Jablonska & Latowska, 2024; Sukindar et al., 2024 dan Kaya & Asici, 2025 menunjukkan bahwa kualitas permukaan terbaik diperoleh dari *layer thickness* yang rendah dan *nozzle temperatur* yang tinggi. Penelitian Vidakis et al., 2022; Lokesh et al., 2023; dan Sukindar et al., 2024 juga menyimpulkan bahwa *layer thickness* merupakan faktor yang berpengaruh signifikan pada respon kualitas permukaan. Penelitian Barrios & Romero, 2019 menyimpulkan bahwa respon kualitas permukaan dipengaruhi oleh faktor *flow rate* dan *print acceleration*. Penelitian Hadeeyah et al., 2023 menunjukkan penambahan serat karbon pada PETG dapat meningkatkan kehalusan permukaan. Penelitian terdahulu cenderung berfokus pada pencapaian respon kualitas permukaan terbaik dan mengabaikan respon waktu proses cetak. Fakta bahwa parameter untuk mencapai kualitas terbaik memberikan dampak waktu cetak yang lebih lambat telah diidentifikasi dalam penelitian Arian, 2023, namun belum ada solusi optimasi yang secara simultan menjawab kedua tantangan yang saling bertolak belakang ini.

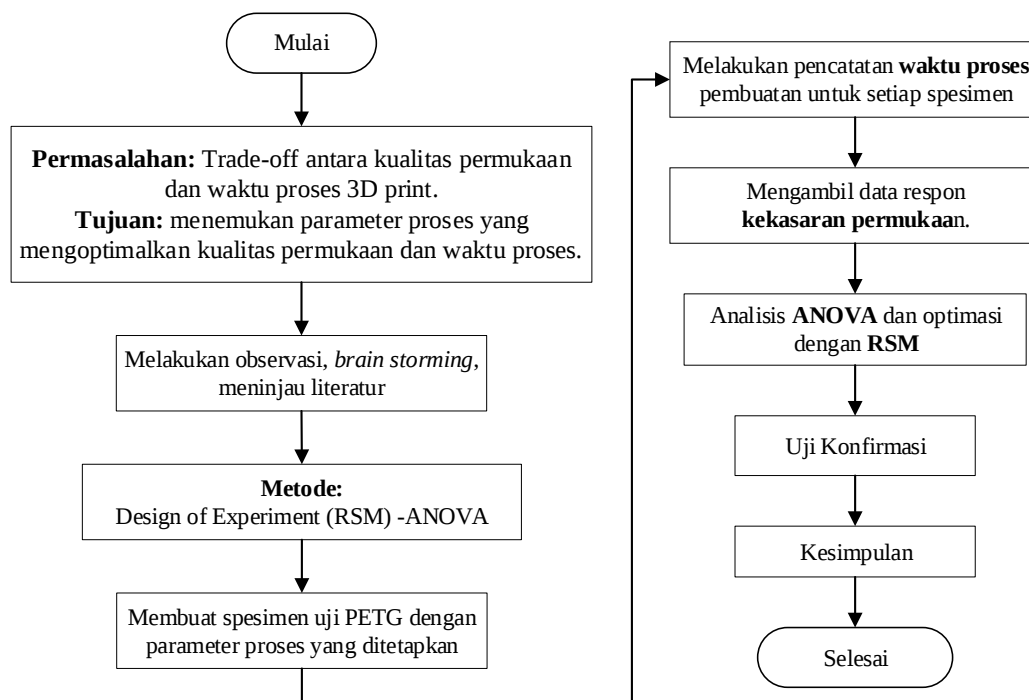
Penelitian ini hendak menganalisis dan mengoptimalkan parameter proses cetak 3D material PETG guna mencapai kualitas permukaan yang maksimal dengan waktu cetak yang minimal. Penelitian bertujuan memberikan rekomendasi parameter terbaik untuk membantu UMKM dan industri menetapkan strategi proses cetak 3D yang memiliki kualitas permukaan sesuai preferensi konsumen tanpa mengorbankan efisiensi waktu proses produksi. Kebaruannya, penelitian ini mengisi celah penelitian-penelitian terdahulu dengan berfokus pada optimasi multi-respon untuk mencetak material PETG dengan parameter proses terbaik untuk mencapai titik optimum antara kualitas permukaan tertinggi dan waktu cetak tercepat secara simultan.

METODE

Penelitian menggunakan metode eksperimen dengan parameter yang sesuai dengan rekomendasi *Response Surface Method* (RSM) tipe Box-Behnken. Metode eksperimen RSM pada penelitian ini dilakukan dengan bantuan *software Design-Expert 13*. *Software* ini secara otomatis menghasilkan urutan "run order" yang sudah teracak (*randomized*).

Waktu proses pencetakan setiap spesimen dihitung dengan menggunakan *stopwatch* dan dicatat. Selanjutnya, hasil eksperimen dicek dengan *surface roughness tester* untuk mengukur nilai kekasaran permukaan. Penelitian ini menggunakan *surface roughness tester* merk Mitutoyo tipe SJ-201P. Pengukuran kekasaran permukaan konsisten dilakukan secara membujur di sepanjang penampang spesimen. Hasil pencatatan waktu proses dan kekasaran permukaan selanjutnya dianalisis secara statistika untuk mengidentifikasi faktor yang berpengaruh signifikan terhadap respon

serta mendapatkan parameter proses terbaik. Analisis statistika dengan ANOVA (level signifikansi $\alpha=0,05$) dan optimasi multi-respon berbasis nilai *Desirability Function* dilakukan dengan menggunakan *software Design-Expert 13*. Parameter proses terpilih selanjutnya diuji konfirmasi untuk mengetahui apakah parameter tersebut dapat diimplementasikan secara nyata dan menghasilkan respon yang sesuai dengan hasil uji statistika. Tahapan penelitian ditampilkan secara detil pada diagram alir penelitian Gambar 2.



Gambar 2. Diagram alir penelitian
Sumber: Dokumentasi pribadi, 2025

Tabel 1. Faktor-level eksperimen

Kode	Faktor	Unit	Level			
			1	2	3	4
A	<i>layer thickness</i>	mm	0,1	0,13	0,17	0,2
B	<i>print speed</i>	mm/s	50	60	70	80
C	<i>print orientation</i>	°	0	15	30	45
D	<i>noozle temperature</i>	°C	230	240	250	260

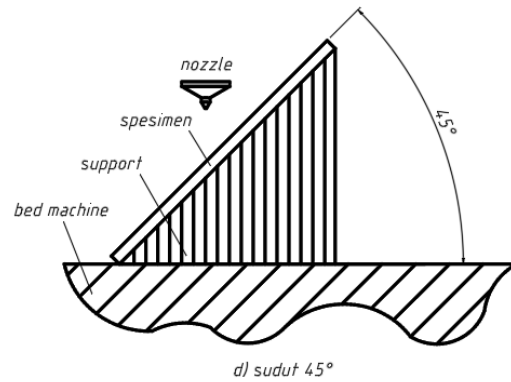
Sumber: Dokumentasi pribadi, 2025

Desain Eksperimen

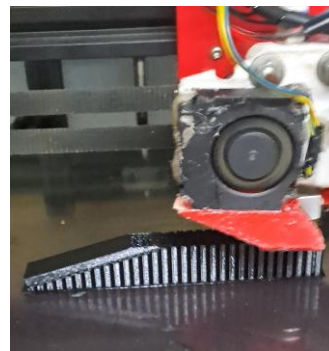
Penelitian ini mengeksplorasi parameter proses pencetakan 3D material PETG. Barrios & Romero, 2019; Kadhum et al., 2023; dan Mehtedi et al., 2024 menyatakan bahwa parameter proses cetak memberikan dampak pada kualitas permukaan produk yang dicapai.

Variasi parameter perlakuan dirancang menggunakan metode *Design of Experiment* (DoE) dengan pendekatan *Response Surface Method* (RSM). Tabel 1 menampilkan faktor dan level perlakuan yang digunakan dalam desain eksperimen. Faktor yang digunakan dalam penelitian ini adalah *layer thickness*,

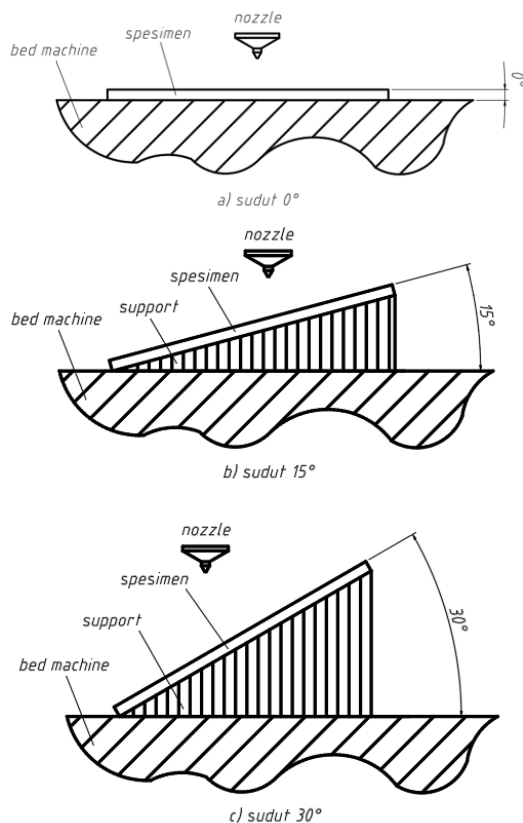
print speed, *nozzle temperatur*, serta satu faktor tambahan *print orientation* yang menjadi kebaruan dalam penelitian ini. Pada penelitian Lokesh et al., 2024 dan Sukindar et al., 2024, *print orientation* mengacu pada *raster angle* (sumbu x - sumbu y). *Print orientation* pada penelitian ini mengacu pada posisi produk terhadap *bed* mesin (sumbu x - sumbu z) pada saat proses pencetakan dilakukan, yang belum pernah diteliti pada material PETG. *Print orientation* diuji dalam penelitian ini dengan tujuan mengidentifikasi pengaruh perubahan sudut cetak terhadap kualitas permukaan produk. Sebab produk yang dicetak oleh mesin 3D print umumnya memiliki kontur dan sudut kemiringan yang berbeda, sehingga menghasilkan kehalusan permukaan yang berbeda pula (lihat Gambar 1 dan Gambar 2). *Print orientation* dalam penelitian divisualisasikan Gambar 3 dan proses pencetakan spesimen ditunjukkan pada Gambar 4.

Gambar 3. Visualisasi *print orientation*

Sumber: Dokumentasi pribadi, 2025

Gambar 4. Proses cetak 3D dengan *print orientation* sebesar 15°

Sumber: Dokumentasi pribadi, 2025



Gambar 5. Sebagian spesimen uji

Sumber: Dokumentasi pribadi, 2025

Gambar 5 menunjukkan bentuk spesimen akhir, sebelum dilakukan pengukuran kualitas kekasaran permukaan. Sebanyak 26 variasi perlakuan dirancang untuk eksperimen, ditampilkan di Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Variasi perlakuan berbasis RSM

Run	Kode Faktor			
	A	B	C	D
1	0,1	50	0	230
2	0,1	60	15	240
3	0,1	70	30	250
4	0,1	80	45	260
5	0,13	50	15	250
6	0,13	60	0	260
7	0,13	70	45	230
8	0,13	80	30	240
9	0,17	50	30	260
10	0,17	60	45	250
11	0,17	70	0	240
12	0,17	80	15	230
13	0,2	50	45	240
14	0,2	60	30	230
15	0,2	70	15	260
16	0,2	80	0	250
17	0,1	50	0	230
18	0,13	60	0	240
19	0,17	70	0	250
20	0,2	80	0	260
21	0,17	80	15	230
22	0,2	70	15	240
23	0,2	60	30	230
24	0,17	50	30	240
25	0,13	70	45	230
26	0,1	80	45	240

Sumber: Dokumentasi pribadi, 2025

Respon Waktu Proses dan Pengujian Kualitas Permukaan

Waktu proses pembuatan setiap spesimen diukur menggunakan *stopwatch* (dalam detik) dan didokumentasikan. Waktu proses yang tercatat pada *software* pencetak 3D print digunakan sebagai pembanding. Pengukuran kualitas permukaan dilakukan dengan menggunakan alat ukur kekasaran permukaan. Berbeda dengan penelitian Vidakis et al., 2022 dan Kaya & Asici (2025) yang menggunakan alat mikroskop optik, penelitian ini menggunakan alat *Surface Roughness Tester* merk Mitutoyo tipe SJ-201P. Nilai kekasaran rata-rata (R_a) dalam satuan mikrometer (μm) digunakan sebagai tolok ukur kualitas permukaan dalam penelitian ini (Sukindar et al., 2024). Proses pengukuran kekasaran permukaan dapat dilihat pada Gambar 6. Setiap spesimen diukur kekasaran permukaannya sebanyak tiga kali dan dihitung nilai rata-ratanya. Seluruh hasil pencatatan waktu proses

dan pengukuran kekasaran permukaan disajikan pada Tabel 3.

Gambar 6. Pengukuran kekasaran permukaan untuk memperoleh nilai R_a

Sumber: Dokumentasi pribadi, 2025

Tabel 3. Data hasil pengujian

Run	Rata-rata Hasil Respon	
	R_a (μm)	Waktu Proses (detik)
1	2,2	2362
2	19,6	10140
3	18,1	14820
4	14,1	16980
5	26,9	8580
6	4,1	2088
7	16,9	13440
8	23,3	11340
9	18,8	10920
10	21,1	11940
11	3,5	1618
12	33,2	5580
13	23,5	11100
14	32,6	8220
15	37,9	5040
16	6,0	1363
17	2,7	2673
18	2,8	1945
19	3,3	1684
20	6,1	1421
21	31,4	5580
22	38,0	5100
23	33,1	8400
24	19,7	10860
25	15,6	13500
26	13,21	17040

Sumber: Dokumentasi pribadi, 2025

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Respon dengan ANOVA

Data waktu proses dan kekasaran permukaan dianalisis secara statistik di *software Design-Expert* 13. Analisis statistik ANOVA dilakukan untuk mengetahui kontribusi setiap faktor terhadap variabel respon (Ismartaya et al., 2023). ANOVA membantu peneliti mengidentifikasi faktor

yang paling mempengaruhi respon (Mehtedi et al., 2024; Ismartaya et al., 2025). Hasil analisis ANOVA untuk kekasaran permukaan dan waktu proses masing-masing ditampilkan pada Tabel 4 dan Tabel 5. Sedangkan model matematika yang terbentuk ditunjukkan pada persamaan 1 (untuk respon kekasaran permukaan) dan persamaan 2 (untuk respon waktu proses).

$$\begin{aligned}
 Y_{rough} = & 26,60 + 10,26 \times A + 5,07 \times B + 10,13 \times C + 2,03 \times D + 8,43 \times AB + 7,17 \times AC \\
 & - 2,36 \times AD + 9,60 \times BC - 3,63 \times BD - 0,56 \times CD + 3,98 \times A^2 - 0,53 \times B^2 \\
 & - 14,81 \times C^2 - 2,74 \times D^2
 \end{aligned}$$

(persamaan 1)

$$Y_{time\ process} = 8496,09 - 1928,86 \times A + 301,94 \times B + 6008,69 \times C + 712,28 \times D$$

(persamaan 2)

Tabel 4 menampilkan hasil uji ANOVA untuk respon kekasaran permukaan. Hasil analisis membentuk model yang menggambarkan pengaruh faktor *layer thickness* (A), *print speed* (B), *print orientation* (C), dan *nozzle temperatur* (D) terhadap respon kekasaran permukaan.

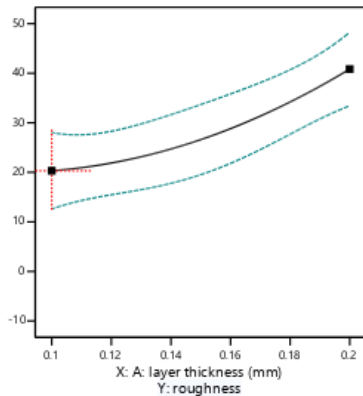
Tabel 4. Hasil ANOVA untuk respon kekasaran permukaan

Kode	DF	Sum of Square	F-value	p-value
Model	14		12,04	0,0001
A	1	348,91	18,08	0,0014
B	1	80,44	4,17	0,0659
C	1	367,74	19,05	0,0011
D	1	31	1,61	0,2312
AB	1	104,82	5,43	0,0398
AC	1	84,93	4,4	0,0598
AD	1	22,17	1,15	0,3068
BC	1	148,19	7,68	0,0182
BD	1	36,06	1,87	0,1989
CD	1	1,49	0,0771	0,7864
A ²	1	31,07	1,61	0,2307
B ²	1	1,11	0,0577	0,8147
C ²	1	663,37	34,37	0,0001
D ²	1	24,47	1,27	0,2842
Res. error	11	212,31		
Total	25	3464,63		

Sumber: Dokumentasi pribadi, 2025

ANOVA digunakan untuk mengevaluasi signifikansi model regresi dan koefisien model individual dari parameter yang berkontribusi terhadap variabel respons (Ismartaya et al.,

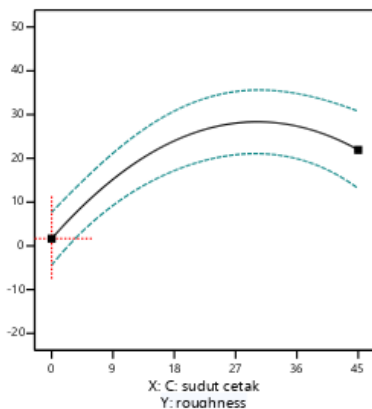
2025). Analisis eksperimen respon kekasaran permukaan menghasilkan model matematika (persamaan 1) yang memiliki nilai R^2 sebesar 0,9387 dan nilai *Adjusted* R^2 sebesar 0,8607. Hal ini menunjukkan bahwa faktor perlakuan mampu menjelaskan 93,87% variabel respon kekasaran permukaan. Nilai p -value < 0,05 menunjukkan signifikansi faktor terhadap respon (Ismartaya et al., 2023; Haque et al., 2025; Ismartaya et al., 2025). Faktor *layer thickness* dan *print orientation* merupakan faktor proses yang berpengaruh secara signifikan terhadap respon kekasaran permukaan, dibuktikan dengan nilai p -value berturut-turut sebesar 0,0014 dan 0,0011. Meski demikian, kontribusi faktor *print orientation* terhadap perubahan kekasaran permukaan adalah 52,99%, lebih besar dari kontribusi *layer thickness* yang 19,53%. Sedangkan faktor *print speed* dan *nozzle temperatur* memberikan pengaruh kecil (Vidakis et al., 2022), dengan berkontribusi total sebesar 7,04%. Hasil ini sejalan dengan penelitian Vidakis et al., 2022; Lokesh et al., 2023; dan Sukindar et al., 2024, yang menyatakan bahwa *layer thickness* berpengaruh signifikan terhadap kualitas kekasaran permukaan. Namun penelitian ini juga menunjukkan bahwa penambahan faktor *print orientation* menggeser besaran kontribusi faktor *layer thickness* terhadap respon kekasaran permukaan.



Gambar 7. Hubungan pengaruh antara *layer thickness* terhadap kekasaran permukaan

Sumber: Dokumentasi pribadi, 2025

Gambar 7 menunjukkan bagaimana *layer thickness* mempengaruhi nilai Ra pada kekasaran permukaan. Sesuai dengan penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Penelitian Vidakis et al., 2022; Jablonska & Latowska, 2024; Sukindar et al., 2024 dan Kaya & Asici, 2025, *layer thickness* yang semakin rendah memberikan kekasaran permukaan yang semakin rendah pula, dan sebaliknya.



Gambar 8. Hubungan pengaruh antara *print orientation* terhadap kekasaran permukaan

Sumber: Dokumentasi pribadi, 2025

Gambar 8 menunjukkan bahwa *print orientation* secara signifikan memberikan perubahan pada kekasaran permukaan. *Print orientation* yang mendekati 0° akan memberikan nilai kekasaran permukaan yang semakin rendah. Tingkat nilai kekasaran permukaan akan semakin meningkat seiring penambangan besar sudut hingga *print orientation* 30°, dan kembali menurun ketika mendekati *print orientation* 45°. Hal ini

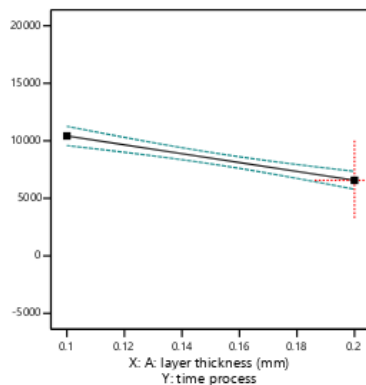
merupakan temuan baru dalam penelitian terkait kualitas permukaan produk 3D print. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa *print orientation* 0° memberikan kualitas kekasaran permukaan paling minimal dibanding sudut lainnya.

Tabel 5. ANOVA untuk respon waktu proses

Kode	DF	Sum of Square	F-value	p-value
Model	4	6,25e+08	113,11	< 0,001
A	1	5,47e+07	39,59	< 0,001
B	1	1,29e+06	0,93	0,345
C	1	5,36e+08	387,86	< 0,001
D	1	6,81e+06	4,92	0,037
Res. Error	21	2,90e+07		
Total	25	6,54e+08		

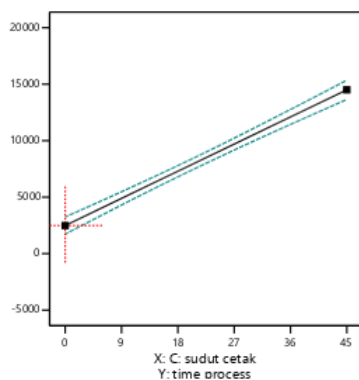
Sumber: Dokumentasi pribadi, 2025

Tabel 5 menampilkan hasil uji ANOVA terhadap faktor *layer thickness* (A), *print speed* (B), *print orientation* (C), dan *nozzle temperatur* (D) untuk respon waktu proses pencetakan. Model statistika digunakan untuk menilai dampak parameter proses pada respon (Vidakis et al., 2022). Analisis eksperimen respon waktu proses pencetakan menghasilkan model matematika (persamaan 2) yang memiliki nilai R^2 sebesar 0,9556 dan nilai *Adjusted R²* sebesar 0,9472. Hal ini menunjukkan bahwa faktor perlakuan mampu menjelaskan 95,56% variabel respon waktu proses pencetakan. Faktor *layer thickness* dan *print orientation* kembali menjadi faktor proses yang secara signifikan berpengaruh pada respon waktu proses pencetakan, dibuktikan dengan nilai *p-value* keduanya yang lebih kecil dari 0,0001. Meski demikian, kontribusi faktor *print orientation* (81,92%) jauh lebih besar dibandingkan kontribusi faktor *layer thickness* 8,36%. Sedangkan faktor *print speed* dan *nozzle temperatur* hanya memberikan pengaruh total sebesar 1,44% terhadap respon waktu proses pencetakan. Gambar 9 menunjukkan bagaimana pengaruh *layer thickness* terhadap respon waktu proses pencetakan. Gambar 9 menunjukkan bahwa *layer thickness* yang tebal cenderung mempercepat proses pencetakan, dan demikian sebaliknya. Hal ini disebabkan peningkatan ketebalan *layer thickness* akan mendukung pemenuhan dimensi lebih cepat, sehingga meminimalkan waktu proses pencetakan.



Gambar 9. Hubungan pengaruh antara *layer thickness* terhadap waktu proses pencetakan

Sumber: Dokumentasi pribadi, 2025



Gambar 10. Hubungan pengaruh antara *print orientation* terhadap waktu proses pencetakan

Sumber: Dokumentasi pribadi, 2025

Gambar 10 menunjukkan pengaruh *print orientation* yang secara signifikan mempengaruhi durasi proses pencetakan. Peningkatan kemiringan sudut pencetakan menyebabkan proses tambahan berupa pembuatan *reinforcement support* (lihat Gambar 3) yang menyebabkan waktu proses semakin panjang. Hal ini sejalan dengan penelitian Arian, 2023 yang menyatakan bahwa parameter proses berperan besar dalam menentukan *lead time*, kualitas, dan biaya proses pencetakan 3D print.

Optimasi multi-respon dengan RSM

Pendekatan dengan metode RSM telah diterapkan untuk mengoptimalkan parameter pencetakan 3D yang berbeda (Vidakis et al., 2022). Optimasi diatur untuk meminimalkan respon kekasaran permukaan dan waktu proses secara simultan, pada setiap target *print*

orientation. Pengaturan faktor dan respon ditampilkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Pengaturan target setiap faktor dan respon pada proses optimasi

Faktor	Target	Lower Limit	Upper Limit
A: <i>layer thickness</i>	<i>is in range</i>	0.1	0.2
B: <i>print speed</i>	<i>is in range</i>	50	80
C: <i>print orientation</i>	<i>is target = 0, 15, 30, dan 45</i>	1	45
D: <i>nozzle temperatur</i>	<i>is in range</i>	230	260
<i>Roughness</i>	<i>minimize</i>	2.21	38.03
<i>Time process</i>	<i>minimize</i>	1363	17040

Sumber: Dokumentasi pribadi, 2025

Respon nilai kekasaran permukaan diatur pada target minimal untuk memperoleh nilai R_a (μm) yang paling rendah, mengindikasikan kehalusan permukaan atau kualitas permukaan yang lebih baik. Hal ini sesuai dengan penelitian Lokesh et al., 2024 dan Mehtedi et al., 2024, karena nilai kekasaran permukaan yang minimal menunjukkan kualitas permukaan yang lebih tinggi. Respon waktu proses pencetakan diatur pada target minimal untuk memperoleh waktu proses terpendek (Ismartaya et al., 2025). Sebab waktu proses yang panjang mempengaruhi peningkatan biaya proses (Arian, 2023). Komposisi tingkat kepentingan respon kekasaran permukaan dan waktu proses dirancang seimbang. Optimasi dilakukan untuk setiap variasi *print orientation*. Tujuannya memberikan data untuk membantu operator produksi 3D print dalam menentukan parameter terbaik sesuai dengan kontur kemiringan pada produk.

Tabel 7 menunjukkan hasil optimasi berupa parameter proses terbaik untuk setiap sudut proses pencetakan. Parameter terbaik pencetakan pada sudut 0° adalah A0,17-B70-C0-D230. Parameter ini memiliki nilai desirability tertinggi, yaitu 0,998, dengan prediksi hasil kekasaran permukaan $2,21 \mu\text{m}$ dan waktu proses 1430 detik. Pada sudut pencetakan 15° , parameter terbaiknya ialah A0,18-B50-C15-D253, yang memiliki nilai desirability 0,692 dengan prediksi hasil kekasaran permukaan $22,14 \mu\text{m}$ dan waktu

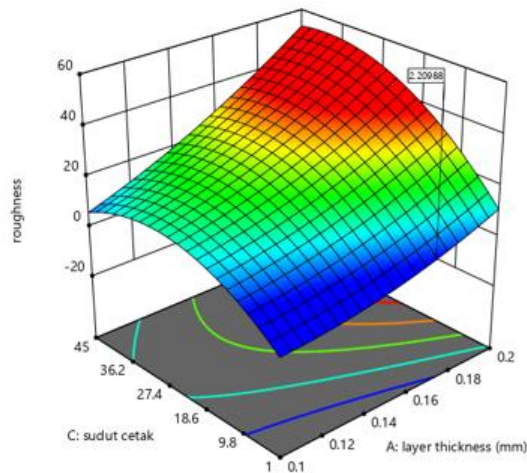
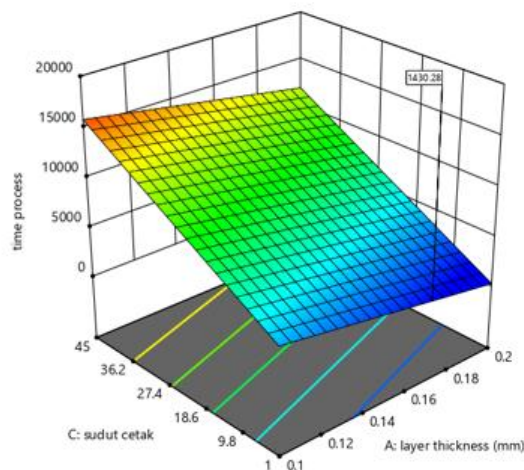
proses 5313 detik. Sedangkan untuk sudut pencetakan 30°, optimasi menghasilkan parameter terbaik A0,18-B50-C30-D245. Parameter ini diprediksi akan menghasilkan kekasaran permukaan 24,42 μm dan waktu proses 8858 detik, serta memiliki nilai desirability 0,583. Parameter terbaik untuk sudah cetak 45° ialah A0,19-B50-C45-D230. Kekasaran permukaan diprediksi mencapai nilai 12,58 μm dalam waktu proses 11727 detik. Parameter ini memiliki nilai desirability 0,622. Perbedaan signifikan nilai kekasaran permukaan antara sudut *print orientation* 0° dengan sudut lain (15°, 30°, dan 45°) secara

praktis disebabkan oleh faktor *stair-stepping* di mana permukaan miring tampak berundak-undak menyerupai anak tangga. Hal ini merupakan konsekuensi alami metode *additive manufacture* yang membangun objek secara lapis demi lapis. Dampak faktor *stair-stepping* dapat diminimalkan dengan menurunkan parameter *layer thickness* (faktor kedua yang berkontribusi terhadap respon kekasaran permukaan) yang akan berdampak pada pengurangan jarak antara lapisan atas yang baru dengan lapisan sebelumnya. Namun hal ini akan mengorbankan respon waktu proses.

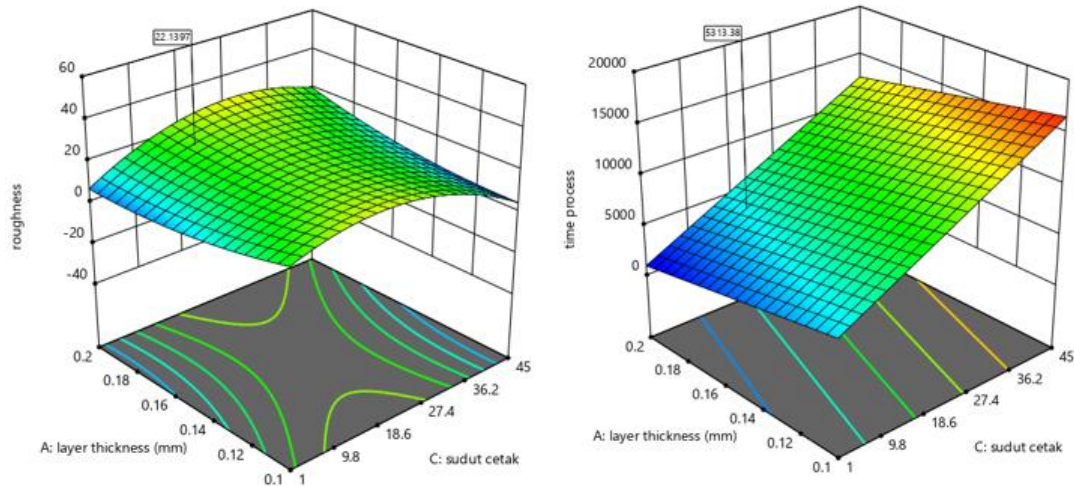
Tabel 7. Hasil optimasi dengan *software* Design Expert 13

Print orientation (C)	Layer thickness (A)	Print speed (B)	Nozzle temp. (D)	Roughness (pred.)	Time process (pred.)	Desirability
°	mm	mm/s	°C	μm	sec.	
0	0,17	70	230	2,21	1430	0,998
15	0,18	50	253	22,14	5313	0,692
30	0,18	50	245	24,42	8858	0,583
45	0,19	50	230	12,58	11727	0,622

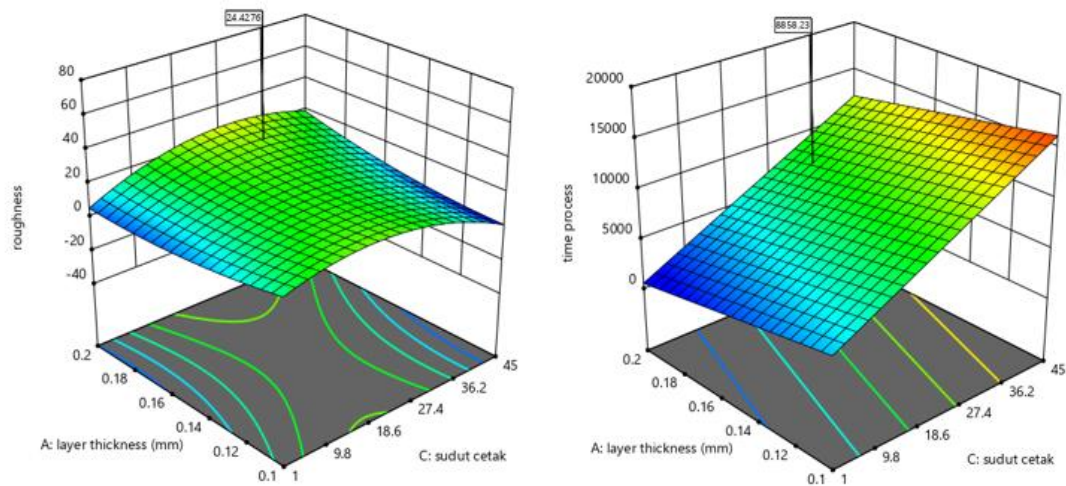
Sumber: Dokumentasi pribadi, 2025



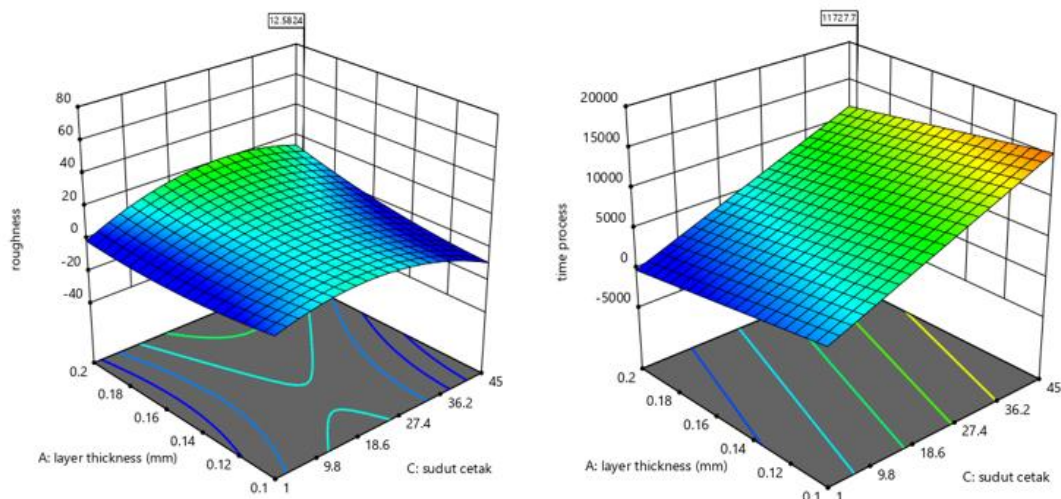
Sudut Pencetakan 0°



Sudut Pencetakan 15°



Sudut Pencetakan 30°



Sudut Pencetakan 45°

Gambar 11. Grafik *Surface Respon* antara *layer thickness*, *print orientation*, dan respon kekasaran permukaan-waktu proses yang optimal

Sumber: Dokumentasi pribadi, 2025

Gambar 11 menunjukkan visualisasi dalam bentuk grafik respon permukaan yang memuat titik optimal respon yang dapat dicapai. Grafik respon permukaan memuat faktor *layer thickness*, *print orientation*, serta nilai optimal dari kekasaran permukaan dan waktu proses. Terdapat 4 grafik berbeda sesuai dengan *print orientation* yang digunakan, yaitu 0°, 15°, 30°, dan 45°.

Uji Konfirmasi Parameter Terbaik

Parameter terbaik perlu diimplementasikan secara langsung untuk mengevaluasi apakah parameter tersebut dapat diaplikasikan secara

aktual dan apakah parameter tersebut menghasilkan respon sesuai dengan prediksi. Tabel 8 memaparkan hasil uji konfirmasi untuk setiap parameter dan sudut cetak. Setiap parameter diuji sebanyak 3 kali untuk mengecek konsistensi data. Hasil uji konfirmasi menunjukkan bahwa parameter terbaik yang diimplementasikan berhasil mengoptimalkan kekasaran permukaan dan waktu proses secara simultan. Nilai yang diperoleh dari percobaan tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan dibandingkan dengan nilai prediksi, sehingga mengonfirmasi keakuratan model yang dikembangkan.

Tabel 8. Hasil uji konfirmasi setiap parameter terbaik untuk setiap sudut cetak

Sudut cetak	Parameter	Roughness (µm)			Time process (sec)
		trial 1	trial 2	trial 3	trial 1, 2, 3
0	A0,17-B70-C0-D230	2,11	2,03	1,78	1450
15	A0,18-B50-C15-D253	23,19	23,72	23,55	5270
30	A0,18-B50-C30-D245	27,90	29,25	28,78	8780
45	A0,19-B50-C45-D230	13,71	14,24	14,42	11825

sumber: Dokumentasi pribadi, 2025

KESIMPULAN DAN SARAN

Optimasi dengan *Response Surface Method* sukses menghasilkan parameter proses cetak FDM untuk material PETG yang mengoptimalkan kekasaran permukaan (Ra) dan waktu proses secara simultan pada setiap sudut orientasi cetak. *Print orientation* menjadi faktor yang paling signifikan dan memberikan kontribusi terbesar terhadap respon, yaitu 52,99% untuk kekasaran permukaan dan 81,92% untuk waktu proses. Parameter proses terbaik, untuk mencapai kualitas permukaan terbaik dan waktu proses tercepat, berbeda untuk setiap sudut:

- sudut 0°: *layer thickness* 0,17 mm, *print speed* 70 mm/s, dan *nozzle temperature* 230 °C.
- sudut 15°: *layer thickness* 0,18 mm, *print speed* 50 mm/s, dan *nozzle temperature* 253 °C.
- sudut 30°: *layer thickness* 0,18 mm, *print speed* 50 mm/s, dan *nozzle temperature* 245 °C.
- sudut 45°: *layer thickness* 0,19 mm, *print speed* 50 mm/s, dan *nozzle temperature* 230 °C.

Meskipun parameter proses terbaik berbeda untuk setiap sudut, analisis menunjukkan kecenderungan yang konsisten

dimana parameter *layer thickness* cenderung berada pada nilai tinggi (mendekati 0,2 mm), sementara *print speed* cenderung berada pada nilai rendah (50 mm/s). Kombinasi ini terbukti efektif dalam menghasilkan kualitas permukaan yang baik dengan waktu proses yang relatif lebih cepat. Dengan demikian, penelitian ini secara kuantitatif memberikan rekomendasi parameter proses cetak FDM-PETG yang terverifikasi untuk membantu industri dan UMKM dalam memilih strategi manufaktur yang tepat berdasarkan sudut geometri produk, tanpa mengorbankan efisiensi waktu produksi.

DAFTAR PUSTAKA

- Arikan, V. (2023). Optimizing Infill Parameters for Improved Mechanical Performance and Cost Savings in Additive Manufacturing. *International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering (IJCESN)*, 9(3), 225-232. DOI: 10.22399/ijcesen.1324071
- Barrios, J.M., & Romero, P.E. (2019). Improvement of Surface Roughness and Hydrophobicity in PETG Parts manufactured Via Fused Deposition Modeling (FDM): An Application in 3D Printed Self-Cleaning Parts. *Materials*, 12, 2499. doi:10.3390/ma12152499

- Bruni, C., Gianangeli, C., Mancia, T., Greco, L., Pieralisi, M. (2020). Improving Dimensional and Surface Quality of Additive Manufactured Parts. *J. Phys. Conf. Ser.*, 1507 042003. DOI: [10.1088/1742-6596/1507/4/042003](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1507/4/042003)
- Dezaki, L.M., Ariffin, M.M.K.A., & Ismail, M.I.S. (2020). Effects of CNC Machining on Surface Roughness in Fused Deposition Modelling (FDM) Products. *Materials*, 13(11), 2608. <https://doi.org/10.3390/ma13112608>
- Hadeeyah, A., Emhemed, I.A.F., Alhader, F., Masmoudi, N., & Wali, M. (2023). Improve the Surface Roughness of PETG Products in FDM 3D Printing Process with Addition of Carbon Fiber. *Conference: Bani Waleed University Journal of Humanities and Applied Sciences*. 258-263. DOI:10.58916/jhas.v8i3
- Haqae, M.M.M., Dhruho, S.R., Pranto, A.Z., Ahmed, A., Arefin, M.M., Arifuzzaman, M., Islam, M.S. (2025). Impact of process parameters and material selection on the mechanical performance of FDM 3D-Printed components. *Hybrid Advances*, 10, 100502. <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2025.100502>
- Ismartaya, K., Purnomo, R., Bawono B., & Anggoro, P.W. (2023). Experimental investigation of SC108 clamping components hardening parameter based on AISI 4140 steel to distortion minimization. *Cogent Engineering*, 10(1), 2234716, DOI: 10.1080/23311916.2023.2234716
- Ismartaya, K., Limanta, D.M., Nugraha, A., Sukwadi, R., & Yang, C. (2025). Investigation of CNC Lathe Machining Parameters for AMS 5643 using Taguchi-RSM with CAM Simulation Approach. *Management and Production Engineering Review*, 15(1), 1-14. DOI: [10.24425/mper.2025.153931](https://doi.org/10.24425/mper.2025.153931)
- Jablonska, M., & Lastowska, O. (2024). Enhancing of Surface Quality of FDM Moulded Materials through Hybrid Techniques. *Materials*, 17, 4250. <https://doi.org/10.3390/ma17174250>
- Kadhum, A.H., Al-Zubaidi, S., Abdulkareem, S.S. (2023). Effect of the Infill Pattern on the mechanical and Surface Characteristics of 3D Printing of PLA, PLA+ and PETG Materials. *Chem Engineering*, 7(46). <https://doi.org/10.3390/chemengineering7030046>
- Kaya, B.M. & Asici, C. (2025). Analysis of Surface Roughness and Strain Durability of Eyeglasses Frames by the 3D Printing Technology. *ACS Omega*, 10(12), 12214-12223. DOI:10.1021/acsomega.4c10592
- Lokesh, N., Reddy, J.S., Praveen, B.A., Veeresh, Y.M.K., Acharya, B.S., Kapse, J.E., Nadig, P.P., Prasad, M. (2023). Evaluation and Optimization of Process Parameter for Surface Roughness of 3D-Printed PETG Specimens Using Taguchi Method at Constant Printing Temperature. *Advances in Mechanical Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer*, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-9057-0_22
- Mehtedi, M.E., Buonadonna, P., Mohtadi, R.E., Aymerich, F., Carta, M. (2024). Surface quality related to machining parameters in 3D-printed PETG components. *5th International Conference on Industry 4.0 and Smart Manufacturing, Procedia Computer Science*, 232, 1212–1221. DOI: [10.1016/j.procs.2024.01.119](https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.01.119)
- Sukindar, N.M., Yasir, A.S.H.M., Azhar, M.D., Azhar, M.A.M., Halim, N.F.H.A., Sulaiman, M.H., Sabli., A.S.H.A., Ariffin, M.K.A.M. (2024). Evaluation of the surface roughness and dimensional accuracy of low-cost 3D-printed parts made of PLA–aluminum. *Heliyon*, 10, e25508. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25508>
- Vidakis, N., David, C., Petousis, M., Sagris, D., Mountakis, N., Moutsopoulou, A. (2022). The Effect of Six Key Process Control Parameters on the Surface Roughness, Dimensional Accuracy, and Porosity in Material Extrusion 3D Printing of Polylactic Acid: Prediction Models and Optimization Supported by Robust Design Analysis. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*, 5, 100104. <https://doi.org/10.1016/j.aime.2022.100104>